

ВИЛОХИН СЕРГЕЙ АЛЕКСАНДРОВИЧ

**РЕКОНСТРУКЦИЯ ВАКУУМСОЗДАЮЩИХ СИСТЕМ
ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ УСТАНОВОК НЕФТЕХИМИИ НА БАЗЕ ИХ
МАТЕМАТИЧЕСКОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ**

05.17.08 - Процессы и аппараты химических технологий

АФТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание ученой степени

кандидата технических наук

Работа выполнена на кафедре «Машины и аппараты химических производств»
Казанского государственного технологического университета.

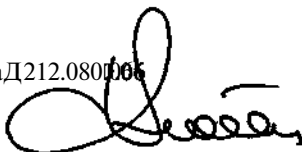
- Научный руководитель - доктор технических наук, профессор
Теляков Эдуард Шархиевич
- Официальные оппоненты - доктор технических наук, профессор
Лаптев Александр Григорьевич
- кандидат технических наук
Бурмистров Алексей Васильевич
- Ведущая организация - Всероссийский научно - исследовательский
институт углеводородного сырья
(ВНИИУС), г. Казань

Защита диссертации состоится *23 мая 2003 г. в 14⁰⁰ часов* на заседании диссертационного совета Д 212.080.06 при Казанском государственном технологическом университете по адресу: 4200015, г. Казань, ул. Карла Маркса, 68, зал заседаний Ученого совета (А-330).

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Казанского государственного технологического университета.

Автореферат разослан *22 апреля 2003 г.*

Ученый секретарь
диссертационного совета Д212.080.06
д.т.н., профессор



С.И. Поникаров

Общая характеристика работы.

Актуальность темы. В настоящей работе проводится исследование вакуум-создающих систем (ВСС) применительно к ректификационным и родственным им установкам, работающим под вакуумом. Для этих установок характерна область абсолютного давления от 1кПа и выше. Для этих условий, в качестве устройств для создания и поддержания вакуума, наиболее часто используются газовые и жидкостные эжекторы, многоступенчатые парозежекторные насосы (ПЭНы), жидкостно-кольцевые вакуумные насосы (ЖКВН), а также комбинации устройств: газовый или паровой эжектор + ЖКВН и т.д.

Анализ действующих установок вакуумной ректификации и проектов таких установок показывает, что до настоящего времени в отечественной промышленности наиболее широко используются ПЭНы, причем вне зависимости от величины остаточного вакуума, поддерживаемого этими ВСС. Основной причиной столь широкого применения парозежекторных вакуумных насосов является простота их конструкции и удобства эксплуатации, долговечность, связанная с отсутствием каких-либо движущихся частей. Однако эксплуатация парозежекторных насосов связана с выбросами вредных веществ в атмосферу на выхлопе агрегата. Одновременно происходит загрязнение и водного бассейна, поскольку конденсаты откачиваемых органических паров смешиваются с водным конденсатом в системах барометрической конденсации парозежекторных насосов. Экологический урон, наносимый работой ПЭНов, зависит от конкретных технологических условий, прежде всего от природы перерабатываемых веществ. В современных условиях экологические характеристики ВСС играют немаловажную роль.

В этих условиях многие действующие технологические объекты зачастую оказываются малорентабельными, что предполагает проведение их реконструкции на базе новой техники и технологии. Рекомендации по эффективности использования ВСС тех или иных типов в зависимости от характера производства, природы откачиваемых газов, производительности ВСС, величины создаваемого вакуума и других факторов в литературе практически отсутствуют. Иностранные фирмы в этом вопросе используют принцип «ноу-хау». Представляется, что при выборе ВСС область создаваемого вакуума, а также конкретные условия работы технологических установок ВСС должны, безусловно, учитываться.

Настоящая работа выполнена в соответствии с Законом Республики Татарстан «Об энергосбережении» и постановлением Кабинета Министров Республики Татарстан № 468 от 03.07.2000г. «О республиканской целевой программе энергосбережения в Республике Татарстан на 2000-2005 годы», а также в рамках хозяйственных договоров между КГТУ и ОАО «Нижнекамскнефтехим».

Цель работы:

1. Обоснование областей эффективного использования ВСС различных типов в зависимости от их производительности, области развиваемого вакуума, характера откачиваемой среды, степени негативного воздействия на окружающую среду.
2. Разработка методики расчета характеристик оптимизированных ВСС на основе обследования действующих установок (задача реконструкции).
3. Разработка математических моделей ВСС, комплексно учитывающих характер их работы (природу откачиваемых газов и рабочих агентов, стоимость энергетических ресурсов и т.д.).
4. Разработка рекомендаций по реконструкции действующих ВСС на заводе СПС ОАО «Нижнекамскнефтехим», практическая реализация задачи реконструкции.

Научная новизна. - С использованием ряда допущений теоретически выведено уравнение, описывающее инвариантные характеристики ЖКВН.

- Исследованы зависимости характеристик жидкостно-кольцевых вакуумных насосов (ЖКВН) от термодинамических параметров рабочей жидкости и откачиваемого газа.

- На основе полученного уравнения разработана термодинамическая модель, позволяющая по экспериментальным характеристикам ЖКВН на произвольной системе в произвольной области параметров состояния провести перерасчет зависимости рабочей производительности для любой другой системы и для любых других комбинаций термодинамических параметров.

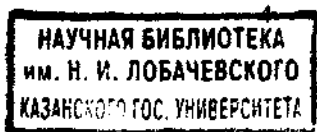
- Определены области рационального использования трех типов ВСС: ПЭНов, ЖКВН и ЖКВН с предвключенным газовым эжектором.

Практическая ценность работы заключается в разработке методики пересчета характеристик действующих вакуумсоздающих систем на базе многоступенчатых пароежекторных насосов на комбинированную систему жидкостно-кольцевой насос с предвключенным газовым эжектором. С использованием данной методики разработаны и выданы проектной организации ПИ «Союзхимпромпроект» КГТУ исходные данные для выполнения проекта реконструкции вакуумсоздающей системы колонны К-382 завода СПС ОАО «Нижнекамскнефтехим».

Апробация работы. Основные положения диссертации докладывались и обсуждались на отчетных научно-технических конференциях КГТУ (г. Казань, 1996, 1998, 2003г.г.), на Восьмой международной конференции молодых ученых «Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений» (1996г.), на Первой Российской студенческой научно-технической конференции «Вакуумная техника и технологии» (2003г).

Публикации. По теме диссертации опубликовано 4 работы.

Структура и объем работы. Диссертация состоит из введения, четырех глав, выводов, списка литературы, включающего 114 наименований и прило-



жения. Основная часть работы изложена на 89 страницах. Работа содержит 35 рисунков и 12 страниц приложения.

Краткое содержание работы.

Во введении обоснована актуальность темы и сформулированы цели и задачи работы.

В первой главе приводится обзор теоретических и экспериментальных работ, посвященных методам и устройствам для создания и поддержания вакуума.

Показано, что жидкостнокольцевые вакуумные насосы обладают по сравнению с ПЭНами рядом преимуществ, особенно при использовании в качестве рабочих жидкостей технологических продуктов, например дистиллятов ректификационных колонн. Область достигаемого вакуума может быть существенно увеличена при использовании комбинированных систем: ЖКВН + газовый эжектор. В качестве рабочего (активного) агента эжектора используется газ с выхлопа ЖКВН, что существенно улучшает экологическую обстановку в окрестностях предприятия. Однако практическое применение этих ВСС сдерживается отсутствием методик их проектирования и привязки к конкретным технологическим объектам.

Во второй главе была поставлена цель - сопоставить три характерных типа ВСС, а именно: ПЭНы, ЖКВН и комбинированная система ЖКВН с предвключенным газовым эжектором, определить области их эффективного использования и разработать математический инструмент для обоснованного выбора того или иного типа ВСС на основе технико-экономического обоснования при проектировании установок вакуумной ректификации.

Экономическая эффективность использования той или иной ВСС определяется энергетическими затратами на создание вакуума (затраты электроэнергии, пара, охлаждающей воды), затратами на ликвидацию опасных последствий работы ВСС (очистка химически загрязненных стоков для ПЭНов). Основное влияние на экономические показатели обычно оказывает первая составляющая.

Для оценки удельных энергозатрат на создание вакуума была проведена обработка паспортных характеристик ПЭНов, представленных в каталогах НИИ «Гипронефтемаш» (1÷4 группы) и ОАО «Вакууммаш» (5÷6 группы), а также некоторых зарубежных фирм (7-я группа). При этом были обработаны данные для 363 ПЭНов. Предварительно было установлено, что удельные энергозатраты хорошо обобщаются следующим уравнением:

$$G_{уд1} = A Q^m \varepsilon^n \quad (1)$$

Результаты обработки представлены в таблице 1.

Сопоставление полученных расчетных значений с паспортными данными представлено на рис.1. Отклонение полученных по уравнению (1) данных от паспортных в большинстве случаев не превышает 7%. Таким образом, уравне-

ние 1 позволяет рассчитать расход пара, обеспечивающий работу ПЭНа для любых заданных условий эксплуатации.

Таблица 1

№	Параметры рабочего пара и влажность откачиваемого газа	A	m	п
1	давление рабочего пара 0.6 МПа, влажность 0%	3,38	-0,021	0,348
2	давление рабочего пара 0.6 МПа, влажность 20%	2,94	-0,027	0,353
3	давление рабочего пара 1 МПа, влажность 20%	1,93	-0,004	0,385
4	давление рабочего пара 1 МПа, влажность 40%	1,6	-0,005	0,391
5	давление рабочего пара 0.6 МПа	3,1	-0,012	0,3
6	давление рабочего пара 0.6 МПа	2,72	-0,026	0,308
7	давление рабочего пара 0.6 МПа	3,1	-0,166	0,363

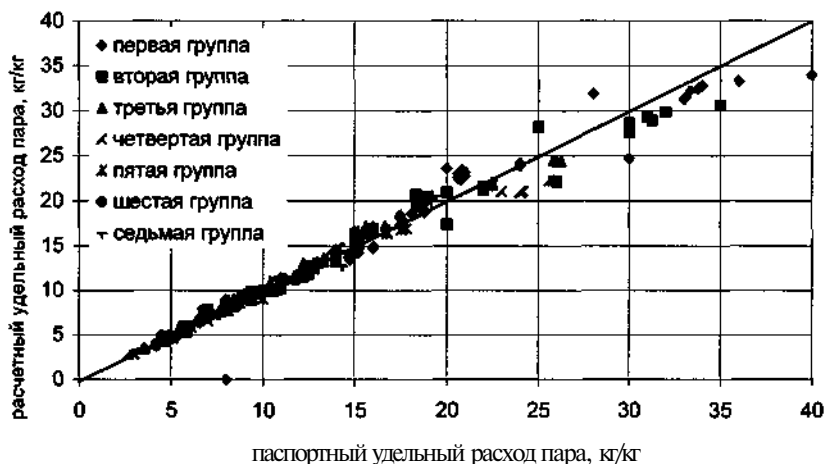


Рис. 1. Сравнение расчетных и паспортных данных удельного расхода пара

Сопоставление энергетических затрат, связанных с эксплуатацией сравниваемых систем (ПЭНы, ЖКВН, ЖКВН с предвключенным газовым эжектором), было проведено непосредственно по стоимости соответствующих статей затрат (пар, электроэнергия, оборотная вода). Стоимость удельных энергозатрат принята по данным ОАО «НКНХ». Результаты сопоставления показаны на рис.2. Как видим в области давлений больше, чем 12кПа ЖКВН однозначно выигрывает у сравниваемых типов ВСС. Дооборудование ЖКВН предвключенным газовым эжектором распространяет область эффективного использования ЖКВН до давления 1-1.5кПа и только при меньших давлениях всасывания использование ПЭНов становится экономически оправданным.

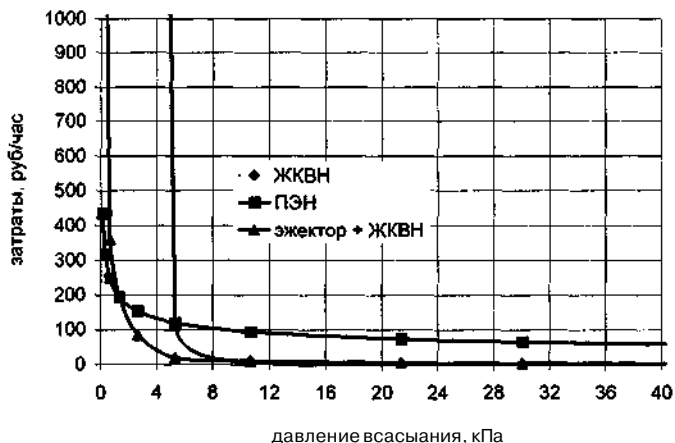


Рис. 2. Области эффективного использования ЖКВН, комбинированных систем ЖКВН с предвключенным эжектором и ПЭНов

Третья глава посвящена построению термодинамической модели ЖКВН и выводу уравнения, описывающего инвариантные характеристики ЖКВН.

Проведенный анализ показал, что на работу ЖКВН основное влияние оказывают следующие факторы: конструктивные, гидродинамические и термодинамические.

Влияние конструктивных особенностей насоса (величина зазоров, расположение всасывающего и нагнетательного патрубков и т.д.) в основном учитывается в характеристике насоса, выдаваемой заводом-изготовителем.

Существенное влияние на характеристику ЖКВН оказывают температура, давление насыщенных паров и состав как рабочей жидкости, так и откачиваемого газа. Использование паспортных характеристик насосов в задачах реконструкции представляется проблематичным, т.к. большинство фирм приводит рабочие характеристики для температуры рабочей жидкости 15°C и для 50%-ной влажности воздуха. Однако температура 15°C для рабочей жидкости в условиях обратного водоснабжения для большинства нефтехимических предприятий практически недостижима. Таким образом, при решении практических задач всегда существует проблема пересчета кривых характеристик, выдаваемых заводами - производителями машин, на другие рабочие условия.

Влияние природы рабочей жидкости на характеристики насосов в литературных источниках исследуется только в части изучения влияния плотности и вязкости рабочей жидкости на гидродинамические аспекты работ ЖКВН. В работах представлены результаты экспериментов, но при этом лишь в отдельных

случаях приводятся обобщения результатов, по которым можно было бы корректировать характеристики машин при смене рабочей жидкости. Отмечается, что наибольшее влияние на гидродинамические закономерности вращения кольца жидкости оказывает плотность и вязкость рабочего тела. С ростом плотности жидкости при прочих равных условиях возрастает производительность ЖКВН и потребляемая мощность, а с ростом вязкости жидкости производительность насоса падает. На рис. 3 представлены экспериментальные зависимости изменения производительности ЖКВН в зависимости от плотности рабочей жидкости. Вязкость рабочей жидкости лежащая в пределах значений $(0,8-1,0)\mu_{\text{воды}}$ существенного влияния на изменение номинальной производительности ЖКВН не оказывает.

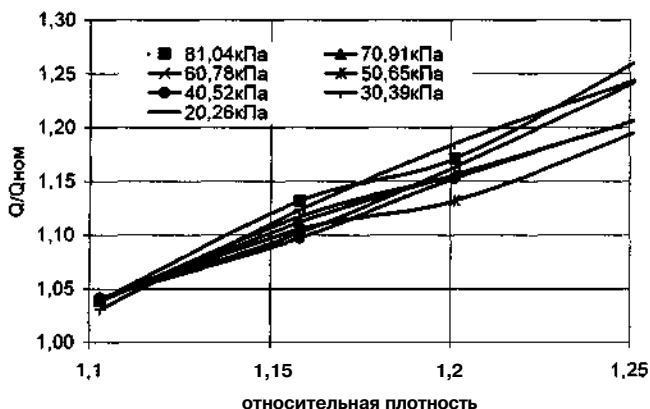


Рис. 3. Изменение номинальной производительности ВВН-3 для различной относительной плотности рабочей жидкости

ЖКВН в математической модели рассматривается как машина сжатия объемного действия. В процессе вращения ротора соединение каждой ячейки с всасывающим окном определяет начало процесса всасывания. При дальнейшем перемещении ячейки вплоть до выходной кромки всасывающего окна происходит расширение газового объема и засасывание откачиваемого газа. После отсечения ячейки от выходной кромки всасывающего окна начинается цикл сжатия, который продолжается вплоть до соединения ячейки с входной кромкой нагнетательного окна. После этого начинается цикл нагнетания, который продолжается вплоть до отсоединения ячейки от выходной кромки нагнетательного окна. В соответствии с этими представлениями схематическая модель машины представлена на рис. 4.

Основные положения и допущения, использованные при формулировке математической модели:

1. Все ячейки ЖКВН предполагаются абсолютно идентичными. Поэтому объем газа засасываемого в отдельную ячейку, характеризует объемную производительность машины.

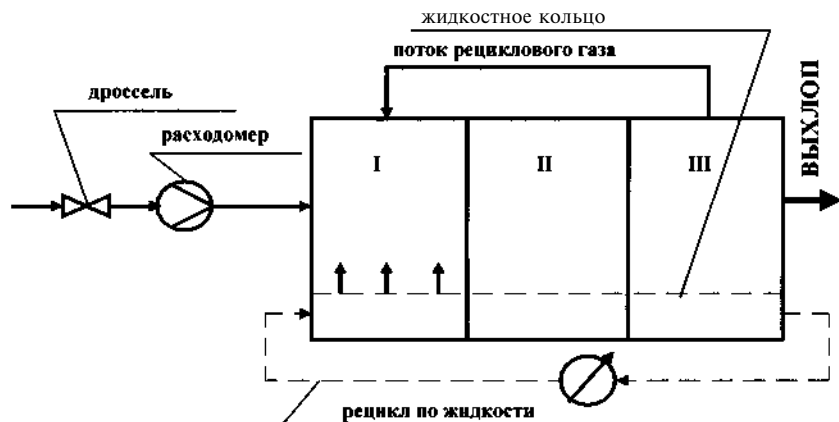


Рис. 4. Схематическая модель математической модели ЖКВН

2. Процесс сжатия в каждой ячейке ЖКВН протекает в три стадии. На стадии I происходит заполнение рабочего объема откачиваемым газом при постоянном давлении. На стадии II осуществляется собственно процесс сжатия газа, заключенного в ячейке. Перетекание сжимаемого газа из зоны II в зону I отсутствует. На стадии III происходит процесс нагнетания (выброс сжатого газа вместе с рабочей жидкостью через нагнетательное окно в отделитель жидкости).

3. На всех стадиях процесса между откачиваемым газом и рабочей жидкостью происходит процесс массотеплообмена, в результате которого между фазами устанавливается состояние термодинамического равновесия. К моменту перехода газа от одной стадии к другой равновесное состояние считается установившимся.

4. Поскольку массовый расход жидкости существенно превышает расход газа, температура равновесного процесса определяется температурой жидкости. Приростом температуры жидкости при перемещении каждой отдельной ячейки из зоны I к зоне III пренебрегаем, т.е. процесс сжатия рассматривается как изотермический.

5. Все перетечки газа, имеющие место в реальном процессе (между боковинами насоса и ротором, между отдельными ячейками, между валом и жидкостным кольцом в зоне III), сводятся только к перетечкам сжатого газа из зоны III в зону I. При этом предполагается, что газ в термодинамическом состоянии, соответствующем условиям процесса в зоне III, мгновенно дроссели-

руется до давления, соответствующего условиям в зоне I, а уже там принимает состояние, отвечающее условиям в этой зоне. Объем рециркулирующего газа зависит от степени сжатия в насосе, т.е. $V_{\text{rec}} = f(\epsilon)$. Именно этот фактор определяет снижение объемной производительности насоса с ростом степени сжатия. От других факторов эта функция также зависит, а вид зависимости определяется изменением термодинамических параметров состояния потока рециркулирующего газа.

6. Для рассматриваемых условий (неглубокий вакуум) при описании процесса допустимо использование допущения о том, что газ подчиняется законам идеального состояния.

При принятых допущениях уравнение для описания объема ячейки I, заполняемого паргазовой средой, имеет вид

$$V_I = V_o(\epsilon) + \Delta V_o(\epsilon, T) + V_o(\epsilon, M) + \bar{V}(\epsilon) + \Delta \bar{V}(\epsilon, M), \quad (2)$$

Используя уравнение состояния идеального газа, запишем изменение объема откачиваемого газа в ячейке I за счет теплообмена газа с рабочей жидкостью, завершаемого до перехода газа из ячейки I в ячейку II.

$$\Delta V_o(\epsilon, T) = V_o(\epsilon) \cdot \left[\frac{V_o(\epsilon, T_o) - V_o(\epsilon, T_I)}{V_o(\epsilon, T_I)} \right] = V_o(\epsilon) \cdot \frac{\Delta T}{T_I}. \quad (3)$$

Изменение объема откачиваемого газа в зоне I за счет массообмена сопровождается изменением не только самого объема, но и количества откачиваемого газа, содержащегося в ячейке. Поэтому баланс объема составляем с использованием относительных концентраций (записаны относительно инертного компонента, нерастворимого в жидкости).

$$\Delta V_o(\epsilon, M) = V_o(\epsilon) \left[\frac{Y_o - Y_I^*}{1 - Y_I^*} \right] \quad (4)$$

В изотермических условиях ($T_o = T_I$) Y_I^* практически всегда $> Y_o$ (предельный случай $Y_o = Y_I^*$). Поэтому составляющая $V_o(?, M)$ всегда отрицательна, т.е. наличие массообмена между откачиваемым газом и рабочим телом всегда приводит к снижению объемной производительности машины. Лишь в тех случаях, когда $T_o > T_I$, а газ во всасывающем трубопроводе близок к состоянию насыщения, данная составляющая может оказаться положительной.

Аналогичным образом:

$$\Delta \bar{V}(\epsilon, M) = \bar{V}(\epsilon) \cdot \frac{Y_I^* - Y_{III}^*}{1 - Y_I^*}. \quad (5)$$

В соответствии с уравнением (5) объем газа, перетекающего из ячейки III в ячейку I, увеличивается не только за счет изменения давления (зависит от ϵ), но и за счет дополнительного испарения рабочей жидкости в перетекающий газ. Действительно, поскольку в обеих ячейках относительная влажность газа

принята равной единице, а процесс рассматривается как изотермический, получим:

$$T_{III} = T_I = T \quad (6); \quad Y_{III}^* = \frac{P_{n.p.}}{P_{III}} \quad (7); \quad Y_I^* = \frac{P_{n.p.}}{P_I} = Y_{III}^* \cdot \varepsilon, \quad (8),$$

С учетом (6)-(8) уравнение (5) приводится к виду:

$$\Delta \bar{V}(\varepsilon, M) = \bar{V}(\varepsilon) \cdot \frac{Y_I^*}{(1 - Y_I^*)} \cdot \frac{(\varepsilon - 1)}{\varepsilon}. \quad (9)$$

Как видим, с ростом степени сжатия будет иметь место прирост объема перетекающего газа за счет соответствующего испарения рабочей жидкости в ячейке I, что приведет к соответствующему снижению объемной производительности насоса.

Ранее отмечалось, что на процесс сжатия в ЖКВН существенное влияние оказывают также характеристики рабочей жидкости, используемой в насосе. В дальнейшем предполагается, что в силу гидродинамических условий формирования жидкостного кольца в рабочей полости насоса, эти свойства для каждой конкретной машины определяют объем ячейки всасывания (V_I), а значит, и производительность ЖКВН. В то же время термодинамические эффекты, учтенные при выводе уравнения (2), не должны зависеть от вышеуказанных свойств рабочей жидкости (плотности и вязкости).

С учетом сделанных замечаний приведем уравнение (2) к виду:

$$\frac{V_o(\varepsilon)}{V_I \cdot F(\mu) \cdot F(\rho)} \cdot \left[\left(1 + \frac{\Delta T}{T_I} + \frac{Y_o - Y_I^*}{1 - Y_I^*} \right) + \frac{\bar{V}(\varepsilon)}{V_o(\varepsilon)} \cdot \left(1 + \frac{Y_I^* \cdot (\varepsilon - 1)}{\varepsilon \cdot (1 - Y_I^*)} \right) \right] = 1 \quad (10)$$

Если принять дополнительное допущение о том, что для конкретной машины отношение объема ячейки I, занятого рециркулирующим газом, к объему, занятому откачиваемым газом $\left(\frac{\bar{V}(\varepsilon)}{V_o(\varepsilon)} \right)$, будет зависеть только от степени сжатия ε (все остальные влияющие параметры учтены в самой структуре уравнения 10), то функция, определяющая соотношение указанных объемов, может быть определена из характеристики, полученной при испытаниях насоса. Обозначим эту функцию как

$$\psi_{rez}(\varepsilon) = \left(\frac{\bar{V}(\varepsilon)}{V_o(\varepsilon)} \right). \quad (11)$$

Поскольку для машин объемного действия понятия объема ячейки и объемной производительности машины эквивалентны, уравнение (10) может быть представлено в виде

$$\frac{Q_o(\varepsilon)}{Q_I \cdot F(\mu) \cdot F(\rho)} \cdot \left[\left(1 + \frac{\Delta T}{T_I} + \frac{Y_o - Y_I^*}{1 - Y_I^*} \right) + \psi_{rez}(\varepsilon) \cdot \left(1 + \frac{Y_I^* \cdot (\varepsilon - 1)}{\varepsilon \cdot (1 - Y_I^*)} \right) \right] = 1, \quad (12)$$

где $Q_0(\epsilon)$ характеризует объемную производительность ЖКВН ($\text{м}^3/\text{мин}$), отнесенную к условиям всасывания (замеряется при испытаниях машины для некоторых заданных условий), а Q_1 - полная объемная производительность (с учетом расхода рециркулирующего газа); $F(\mu)$, $F(p)$ - функции, учитывающие влияние плотности и вязкости рабочей жидкости на производительность машины при заданной температуре.

Согласно рис. 3 и принятию допущению по вязкости ($F(\mu) = 1$) поправочный коэффициент производительности ЖКВН при изменении свойств рабочей жидкости имеет следующий вид:

$$F(p) = 1,1(\rho/\rho_0) - 0,1, \quad (13)$$

где $\rho_0 = 998 \text{ кг/м}^3$.

Уравнение (12) определяет семейство инвариантных характеристик ЖКВН. В уравнении учтена зависимость характеристик как от свойств рабочей жидкости, так и от эффектов испарения (конденсации) откачиваемого и рециркулирующих потоков газа внутри ЖКВН, а также неизотермичность процесса сжатия. В число инвариантов входит кривая $Q_0(\epsilon) = f(\epsilon)$, полученная при испытаниях ЖКВН для каких-то заданных (известных) условий: определена система (например, вода-воздух), заданы: P_0 , P_k , T_0 , $T_1 = T_{II} = T_{III}$, Y_0 .

В качестве рабочей системы при испытаниях ЖКВН, как правило, выступает система вода - воздух. При этом атмосферный воздух перед входом во всасывающий патрубок подвергается дросселированию. При испытаниях в лучшем случае фиксируются температура рабочей жидкости, подаваемой в ЖКВН, температура откачиваемого воздуха и его относительная влажность. Обычно температуры в условиях испытания достаточно близки друг к другу, что позволяет пренебречь поправкой (3), но влияние поправки, связанной с испарением рабочей жидкости в откачиваемый газ (уравнение 4), может быть достаточно значительным.

Действительно:

$$Y_0 = \frac{\varphi \cdot P_{n.p.}^{T_0}}{P_k} \quad (14)$$

и

$$Y_1^* = \frac{P_{n.p.}^{T_1}}{P_k}, \quad (15)$$

Поскольку для условия испытания $P_k = P_0$, величина поправки, вызванной учетом массообмена между откачиваемым воздухом и рабочей жидкостью, будет определяться выражением

$$\Delta V_0(\epsilon, M) = V_0(\epsilon) \cdot \left[\frac{Y_0 - Y_1^*}{1 - Y_1^*} \right] = V_0(\epsilon) \cdot \frac{Y_1^*}{(1 - Y_1^*)} \cdot \frac{(\varphi - \epsilon)}{\epsilon}. \quad (16)$$

С учетом (16) уравнение (12) для условий дросселирования окружающего воздуха (характерно для условий испытания) приводится к виду

$$\frac{Q_o(\varepsilon)}{Q_1 \cdot F(\rho)} \cdot \left\{ 1 + \frac{\Delta T}{T_1} + \frac{Y_1^* \cdot (\varphi - \varepsilon)}{\varepsilon \cdot (1 - Y_1^*)} + \psi_{\text{rez}}(\varepsilon) \cdot \left[1 + \frac{Y_1^* \cdot (\varepsilon - 1)}{\varepsilon \cdot (1 - Y_1^*)} \right] \right\} = 1. \quad (17)$$

При $\varepsilon \rightarrow 1$ перетечки газа между ячейками I и III уменьшаются (движущая сила процесса стремится к 0), т.е. $\psi_{\text{rez}}(\varepsilon) \rightarrow 0$. Очевидно, что в этом случае

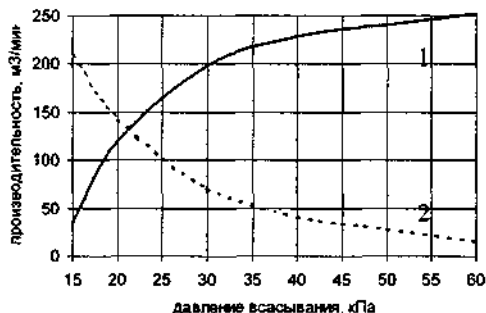


Рис. 5. Зависимость производительности ВВН-3 и величины перетечек от давления всасывания

1 - паспортные данные,
2 - расчетные данные перетечек в насосе

$Q_1 = Q_{o \max}$. Для ВВН - 3, характеристика которого представлена на рис. 5, значение $Q_{o \max} = 264,4 \text{ м}^3/\text{час}$. По известным значениям производительности насоса можно определить перетечки при различных давлениях всасывания.

Из уравнения (17) видно, что при $Y_1^* \rightarrow 1$, т.е. при некоторой температуре рабочей жидкости, при которой давление насыщенных паров рабочей жидкости становится равным давлению всасывания, процесс откачки внешней

среды прекращается, поскольку весь объем рабочей ячейки оказывается занят парами рабочей жидкости ($\Delta \dot{V}_o(\varepsilon, \dot{M}) \rightarrow \infty, \Delta \dot{V}(\varepsilon, \dot{M}) \rightarrow \infty$). В литературе именно эти условия определяют в качестве теоретически достижимого вакуума для ЖКВН. Концентрация паров рабочей жидкости в газе ячейки I, очевидно, возрастает с ростом степени сжатия в ЖКВН, т.е. при понижении давления всасывания. Поскольку в соответствии с уравнением (17) при росте степени сжатия происходит одновременное возрастание как объема перетекающего газа, так и степени его насыщения парами рабочей жидкости, величина предельно достижимого вакуума в конкретной ЖКВН будет определяться не только условием $Y_1^* \rightarrow 1$, т.е. температурой процесса, но и величиной перетечек газа, которые учитываются функцией $\psi_{\text{rez}}(\varepsilon)$. Так для насоса ВВН-3 при температуре рабочей жидкости равной 15°C максимально достижимая степень сжатия насоса равна 7,4 (рис.6), при котором давление всасывания равно 14 кПа. В тоже время давление насыщенных паров при этой температуре равно только 1,7 кПа. Как видим фактически достигаемый вакуум в ЖКВН оказывается существенно меньше, чем величина теоретически достижимого вакуума.

На следующем этапе работы для подтверждения адекватности термодинамической модели было проведено сопоставление расчетных и эксперименталь-

ных данных, характеризующих производительность насоса от давления всасывания при различных значениях влажности и различных температурах откачиваемого газа. Результаты сопоставления приведены на рисунках 7-8. Как видим, отклонение данных, рассчитанных по уравнению (17), от экспериментальных значений не превышает 10%.

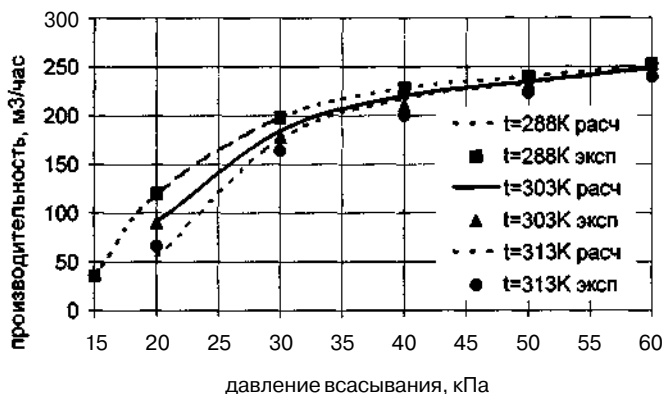


Рис. 6. Зависимость производительности ВВН - 3 от степени сжатия при различных температурах рабочей жидкости

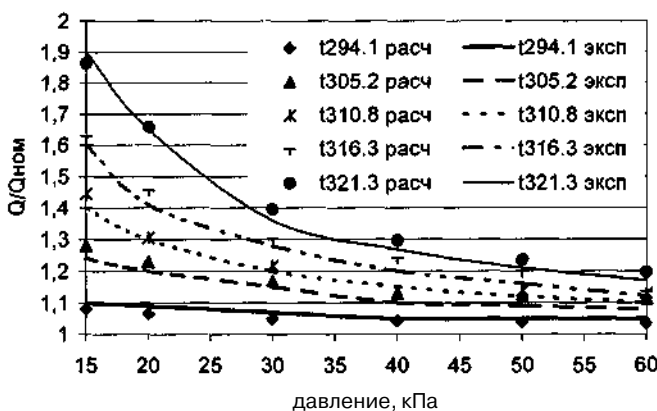


Рис. 7. Поправочный коэффициент для определения объемной производительности при откачке насыщенного воздуха различной температуры машиной серии CL фирмы "Nach"

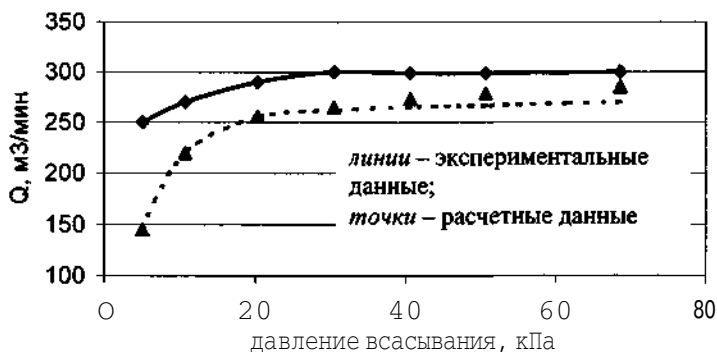


Рис. 8. Поправочный коэффициент для определения объемной производительности при откачке воздуха различной влажности машиной серии CL фирмы "Nach"

Конструктивные особенности исполнения жидкостно-кольцевых машин отечественного и зарубежного производства имеют существенные отличия и соответственно различаются их характеристики. Однако представленная термодинамическая модель ЖКВН в полной мере описывает характеристики и за рубежом моделей.

В четвертой главе приведены результаты разработки исходных данных для выполнения проекта реконструкции ВСС ректификационной колонны К-382 завода СПС ОАО «Нижнекамскнефтехим».

По решению технического совещания при главном инженере завода СПС ОАО «НКНХ» было принято решение о замене ПЭНов на новую вакуумсоздающую систему для колонны К-382.

В 2001 - 2002 г ректификационная колонна К-382 была подвергнута реконструкции, поэтому режим работы колонны в настоящее время существенно отличается от проектного и характеристики новой ВСС не могут быть назначены непосредственно по паспортным данным существующего ПЭНа. Основную сложность при этом представляет вопрос, связанный с назначением потребной производительности ВСС (объемной или массовой), с учетом того, что давление верха ректификационной колонны при работе новой ВСС должно максимально приближаться к существующему значению, поскольку именно оно будет определять остальные параметры технологического режима колонны.

Для относительно объективного назначения данного параметра было проведено технологическое обследование газового тракта от верха ректификационной колонны до всасывающего патрубка ПЭНа на характерном технологическом режиме. В процессе обследования измерялись значения давлений и тем-

ператур газового потока во всех точках газового тракта, приспособленных для проведения измерений. Результаты обследования сведены в таблицу 2.

Таблица 2

Место измерения	Параметры состояния газового потока	
	Р, кПа	Т, °С
Верх ректификационной колонны	6,8	52
Вход в первую ступень дефлегматора	4,9	48
Выход из второй ступени дефлегмации	2,7	15
Вход в ПЭН	0,5	15

Анализ данных обследования позволяет сделать некоторые выводы. Так в газовом тракте от выхода ректификационной колонны до ПЭНа наблюдается достаточно существенное падение давления потока парогазовой смеси (ПГС), особенно для последнего участка (выход из 2-ой ступени дефлегмации - вход в ПЭН). Возможной причиной может быть переизбыточная производительность ПЭНа.

Допущение о существовании парожидкостного равновесия между потоками, отходящими из дефлегматоров, позволяет определить состав ПГС, покидающий 2-ой дефлегматор, а значит и плотность этого потока. Для замеренного давления ПГС на входе в ПЭН его производительность, определяемая по паспортной характеристике, составила 51 кг/час, что соответствует количеству инерта в ПГС равном 30,6 кг/час. Для проверки этой величины был проведен дополнительно расчет натекания атмосферного воздуха в вакуумируемую систему заданного объема. В соответствии с действующими нормами максимально допустимое падение вакуума в вакуумируемой системе ΔP не должно превышать 1,3 кПа в течении 1 часа испытаний. Тогда количество натекающего воздуха может быть определено из условия:

$$G_B = \rho V \frac{\Delta P}{760} \frac{273}{T} \quad (18)$$

Объем вакуумируемой системы (ректификационная колонна, дефлегматоры, транспортные линии) составляет 2000 м^3 . Расчет по уравнению (18) дает количество натекающего воздуха равное 32 кг/час для условий испытаний (18°С) и 27,8 кг/час для рабочих условий (50°С).

Как видим, определенные по данным обследования и по уравнению (18) расходы вполне удовлетворительно согласуются друг с другом.

На следующем этапе был проведен расчет ВСС (ЖКВН с предвключенным газовым эжектором), предназначенный для замены существующего ПЭНа. Давление на входе в газовый эжектор было принято равным 2 кПа. За счет включения в техническое задание некоторых мероприятий, направленных на снижение гидравлического сопротивления транспортных линий, давление верха ректификационной колонны при этом удастся сохранить на прежнем уровне.

Для новой ВСС предложена схема обвязки потоков, представленная на рис. 9. В качестве рабочей жидкости для ЖКВН выбран этилбензол, что позволяет весь конденсат, выпадающий в ЖКВН, возвращать непосредственно в технологический процесс. Пересчет характеристик ЖКВН на новые условия работы, проведенный по уравнению (17), позволил выбрать в качестве исполнительного типоразмера машину ВВН-25.

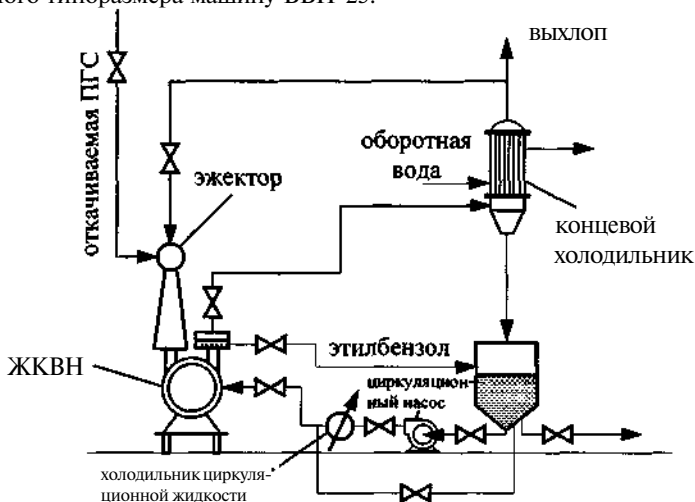


Рис. 9. Схема комбинированной ВСС

Ожидаемый экономический эффект от внедрения новой ВСС составил 1,6млн.руб. в год, срок окупаемости капитальных затрат - 1,2 года. Справка об использовании результатов настоящей работы, выданная заводом СПС ОАО «Нижекамскнефтехим», представлена в приложении диссертации.

Выводы.

1. Определены области эффективного использования ВСС трех типов: ПЭН, ЖКВН и комбинированной системы ЖКВН с предвключенным газовым эжектором.
2. Проведено исследование зависимости характеристик жидкостно-кольцевых вакуумных насосов (ЖКВН) от термодинамических параметров состояния рабочей жидкости и откачиваемого газа.
3. С использованием ряда допущений теоретически выведено уравнение, описывающее инвариантные характеристики ЖКВН.
4. На основе полученного уравнения разработана термодинамическая модель, позволяющая по экспериментальной характеристике ЖКВН полученной на произвольной системе в произвольной области параметров состояния, провести перерасчет характеристики для эксплуатации ЖКВН на любой другой системе жидкость - газ.

5. Разработаны и выданы исходные данные для выполнения проекта реконструкции действующей ВСС на заводе СПС ОАО «Нижнекамскнефтехим». Годовой экономический эффект от внедрения новой ВСС составила 1.6 млн.руб.

Условные обозначения.

$G_{уд}$ - удельный расход; Q' - массовый расход; ϵ - степень сжатия насоса; V_1 - объем всасывающей ячейки; $V_o(\epsilon)$ - объем газа, поступивший из всасывающего трубопровода в ячейку I; $\Delta V_o(\epsilon, T)$ - изменение объема поступившего газа, вызванное изменением температуры при переходе газа из всасывающего трубопровода в ячейку I; $V_o(\epsilon, m)$ - изменение объема поступившего газа за счет массообмена между откачиваемым газом и рабочей жидкостью в ячейке I; $\bar{V}(\epsilon)$ - объем газа, поступившего в ячейку I из ячейки III за счет перетечек газа; $\Delta \bar{V}(\epsilon, M)$ - изменение объема рециркулирующего газа в ячейке I за счет массообмена между рециркулирующим газом и рабочей жидкостью в ячейке I; T_o - температура во всасывающем трубопроводе; T_1 - температура в I ячейке; Y_o - объемная доля конденсирующихся паров в ПГС во всасывающем трубопроводе; Y_1 - равновесная концентрация паров в I ячейке; Y_{III} - равновесная концентрация паров в III ячейке; Q - объемная производительность; $P_{п.р.}^T$ - давление насыщенных паров рабочей жидкости при соответствующей температуре; P_k - давление нагнетания; ρ - плотность рабочей жидкости при рабочих условиях; μ - вязкость рабочей жидкости при рабочих условиях; ϕ - относительная влажность откачиваемого газа.

Основные положения диссертации отражены в публикациях.

1. Вилохин С.А., Зуев В.П., Теляков Э.Ш. Модернизация вакуумсоздающих систем (ВСС) установок вакуумной ректификации // Синтез, исследование свойств, модификация и переработка высокомолекулярных соединений: Тез. докл. VIII Межд. конф. мол. ученых - Казань: Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 1996.-190-191С.

2. Вилохин С.А., Теляков Э.Ш. Математическая модель ЖКВН. - В сб. «Тепло - массообменные процессы и аппараты химической технологии». - Казань. Изд-во Казан. гос. технол. ун-та, 2003. 142 - 150с.

3. Кочубей В.М., Вилохин С.А., Гайнуллин М.Г., Теляков Э.Ш. Термодинамическая модель ЖКВН. //Вакуумная техника и технологии: Тез. докл. Первой Росс, студенч. научно-техн. конф. - Казань: Изд-во Учереждение - Редакция «Бутлеровские сообщения», 2003. - 45-46с.

4. Вилохин С.А., Теляков Э.Ш. Области рационального использования парожеткторных, жидкостно-кольцевых вакуумных насосов и жидкостно-кольцевых вакуумных насосов с предвключенным эжектором. - Казань, 2003. 11с. (Предпринт/Из-во Казан.гос.техн.ун-та, 03П4).

Соискатель

С.А.Вилохин